

# 交流課電によるポリマー材料の耐電圧特性評価

出口 竜也<sup>a)</sup>・迫田 達也<sup>b)</sup>・阿嘉 良昌<sup>c)</sup>・安食 富和<sup>c)</sup>・深野 孝人<sup>c)</sup>

## Withstand Voltage Characteristics of Polymeric Material with AC Voltage Application

Tatsuya DEGUCHI, Tatsuya SAKODA, Yoshiaki AKA, Tomikazu ANJIKI, Takato FUKANO

### Abstract

To widely promote the application of polymer housed electric power equipment from the distribution class to the high voltage class in Japan, details of deterioration owing to pollution deposits and the long-term reliability should be investigated. In this study, to grasp influence of pollution deposits and difference of AC voltage application on insulation performance, AC flashover test and observations of corona or dry-band arc discharge and flashover channel were carried out against silicone rubber samples polluted by red clay or carbon. The results showed that pollution deposits influenced on discharge processes and formation of flashover channel. Such characteristics also influenced on flashover voltage, and the difference of flashover voltage for unpolluted and polluted SiR samples.

**Keywords :** polymer, silicone rubber, discharge

### 1. はじめに

電気絶縁機器は、電力エネルギーを安全且つ確実に送り届けるという重要な役割を担っており、塩害等の厳しい使用条件においても耐え得る絶縁耐力と、風・雪等の外力に耐え得る機械的強度が要求される。従来、電気絶縁機器の外被材料には主に磁器やガラスが使われてきたが、近年ではポリマー材料の適用が拡大している。磁器等の無機材料は、絶縁特性が良く、耐候性も優れている等の長所を持つ反面、重量物であり耐衝撃性が悪い。また、汚損湿潤時に耐電圧が大きく低下する等の短所がある。一方、ポリマー材料は軽量で機械的強度が高く、耐汚損特性にも優れている。しかし欧米に比べて、国内でのポリマー機器の適用は限定的である<sup>1,2)</sup>。長期屋外使用における紫外線や酸性雨等の環境因子や材料表面で発生する放電等の電気的因子による劣化、汚損物質の堆積による特性変化や絶縁性能の低下が危惧されているためである<sup>3)</sup>。従って、日本国内でのポリマー機器の適用を拡大するためには、劣化機構の解明と長期信頼性の把握が最重要課題である<sup>2)</sup>。

ところで、屋外環境で用いられる電気絶縁機器に与えられるストレス要因は様々である。そのため、長期的なポリマー材料の劣化評価として、実フィールドでの長期間曝露が行われている。その結果、電車線路付近では、酸化銅やカーボン粉、塵埃等の付着物が確認されており、これらが

絶縁性能の低下を招くのではないかと危惧されている。

本論文では、ポリマー絶縁機器に付着した汚損物質が絶縁性能に与える影響を評価することを目的とし、人工的に汚損を施したシリコンゴム(SiR: Silicone Rubber)に交流課電フラッシュオーバー(flashover: FO)試験を行い、耐電圧特性評価を行うとともに FO に至るまでの過程を観測し比較・検討した結果について述べる。

### 2. 実験

#### 2.1 実験概要

表1に試験条件、図1に試験装置の概要、図2に試験試料と課電電極、接地電極からなるステンレス製金属電極の配置をそれぞれ示す。本試験では、不溶性の汚損物質として大気中の塵埃を模擬したとの粉と、導電性の汚損物質を模擬したカーボン粉(粒径 40 μm)を用いた。試験は、乾燥時に加え、降雨や霧など多湿な環境を模擬するため、試料表面を湿潤させた状態でも行った。交流電圧として商用周波電圧(60Hz)を使用した。試験試料には幅 50 mm、長さがそれぞれ 30 mm、50 mm、70 mm、厚み 4 mm の板状に形成された SiR を用い、試料の片面に図3に示すような金属電極1組を配した。試料表面における電極間距離は 10 mm、30 mm、50 mm とし、試料は地面と水平になるように設置した。試料表面の湿潤は、試料設置後、超音波加湿器(噴霧量 1.2 l/h)を用いて試験容器(1.2 m×1.2 m×1.2 m)内にイオン交換水を常時噴霧し整えた。噴霧は、汚損を施していない試料は 1 時間、カーボン汚損試料は約 45 分、との粉

a)電気電子工学専攻大学院生

b)電気システム工学科教授

c)株式会社東芝エネルギーシステムソリューション社

汚損試料は約 30 分行い、水分が同量付着するようにした。湿潤後、昇圧レート 0.5 kV/s で昇圧し、FO に至った時の電圧を記録し、FO に至る過程を高速度カメラを用いて撮影した。試験は一条件につき 5 回行った。FO 電圧の確認はデジタル・オシロスコープを用いて行い、FO は、5 mA 以上の電流パルスが確認されるとともに電圧が 0 V 近傍まで低下した時と定義した。ところで、試料表面における汚損物質の汚損量の指標には、不溶性物質付着密度(non-soluble deposit density : NSDD)を用いた。

表 1 試験条件.

Applied voltage	AC (60Hz)
Sample	Unpolluted
	Carbon
	Red clay
Gap length [mm]	10, 30, 50
Arranged angle [°]	0
Test liquid	Deionizer water
Chamber size [m×m×m]	1.2×1.2×1.2
Spray quantity [ℓ/h]	1.2
Voltage increase rate [kV/sec]	0.5
Series resistor [MΩ]	1

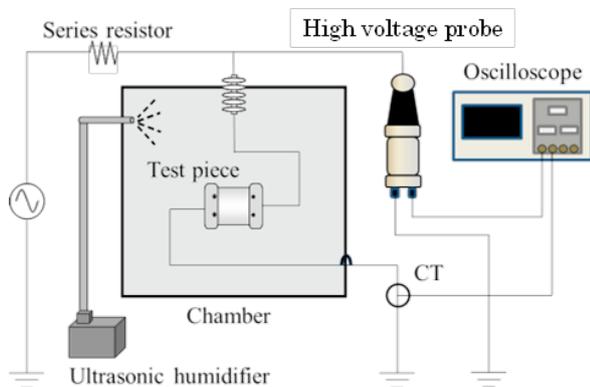


図 1. 実験装置の概要.

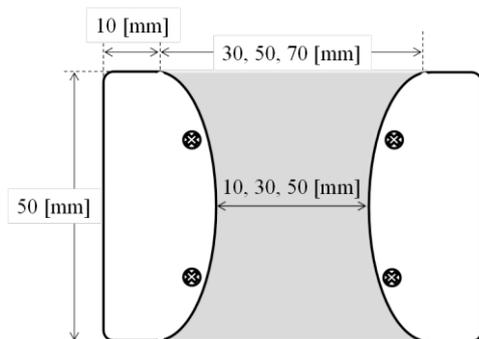


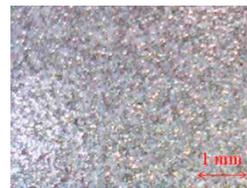
図 2. 試験試料と電極の配置.

## 2.2 実験試料

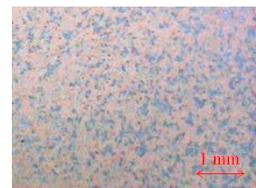
図 3 に各試料の表面をデジタル顕微鏡を用いて拡大し撮影した様子を示す。さらに、図 4 に表面を湿潤後に図 3 と同様に撮影した様子を示す。図 4 より、汚損なしの場合では小さな半球形の水滴が無数に付着しており、良好な撥水性を有している。STRI(Swedish Transmission Research Institute)法<sup>3)</sup>を用いると HC1 である。カーボン汚損時では、半球形を留めていない小さな水滴が付着しており、STRI 法を用いると HC2 程度である。との粉汚損時では、との粉の吸水性により、試料全体が水膜で覆われている状態である。STRI 法を用いると HC6~HC7 程度である。



(a) 汚損なし

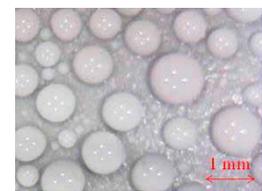


(b) カーボン汚損

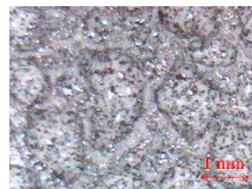


(c) との粉汚損

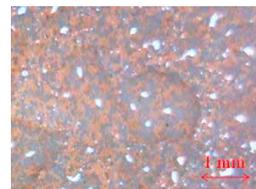
図 3. 各試料の表面を拡大した様子.



(a) 汚損なし



(b) カーボン汚損



(c) との粉汚損

図 4. 湿潤時に各試料の表面を拡大した様子.

以下に各汚損試料の作成方法を示す。カーボン汚損試料の作成方法は、まず、汚損前の試料両端にテープでマスキングを行い、汚損させる領域を形成する。その後、エアコンプレッサを用いて風圧をかけて吹きつけを行うことで、カーボン汚損試料を作製した。なお、NSDD に従い汚損度が 1.01 mg/cm<sup>2</sup> となるように汚損を施した。との粉汚損試料の作成方法は、まず、汚損前の試料両端にテープを貼りつけ、汚損領域の周りに仕切りを作り、イオン交換水にとの粉を混ぜた混濁液を作製した容器内に流し込む。その後、3~7 日程度放置し、自然乾燥させることでとの粉汚損試

料を作製した。なお、との粉の汚損は NSDD に従い、1.05 mg/cm<sup>2</sup> となるように施した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 試料表面乾燥状態

図 5 に各試料の乾燥状態における電極間距離ごとの FO 電圧を示す。同図より、電極間距離が長くなるにつれて FO 電圧が高くなっていることが分かる。これは、電極間距離が長くなるにつれて試料の表面抵抗が高くなるためである。また、各電極間距離でカーボン汚損試料の FO 電圧は汚損なし試料に対して低下が見られるが、との粉汚損試料では FO 電圧は低下せず、汚損なし試料と同程度であった。以上より、試料表面が乾燥状態ではカーボンは SiR の耐電圧特性に影響を与えるものの、との粉はほとんど影響を与えないことが分かった。

図 6 に各試料の乾燥状態における FO の様子を示す。乾燥状態では表面の状態に関わらず、昇圧すると同図のように突発的に FO が発生した。

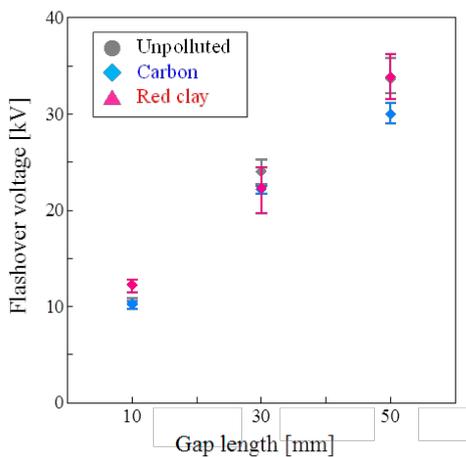
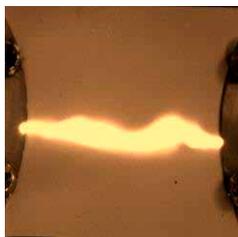
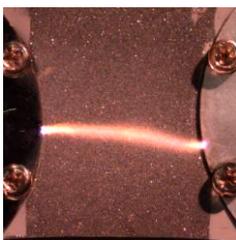


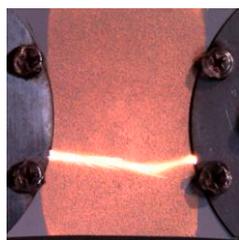
図 5. 乾燥状態における電極間距離ごとの FO 電圧。



(a) 汚損なし



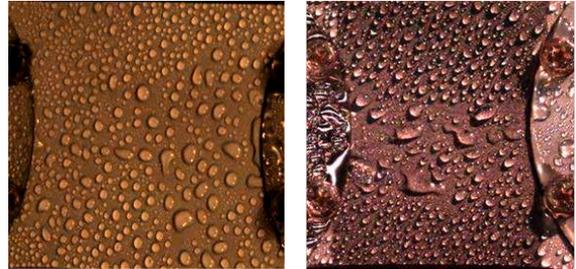
(b) カーボン汚損



(c) との粉汚損

図 6. 乾燥時における各試料の FO の様子。

また、図 7 に FO 後の汚損なし試料とカーボン汚損試料に霧吹きを用いてイオン交換水を吹きかけ撥水性を確認した結果を示す。同図より、汚損なし試料では FO が発生した部分の撥水性が HC2~3 程度まで低下し、カーボン汚損試料では HC4~5 程度まで低下した。



(a) 汚損なし (b) カーボン汚損

図 7. 乾燥時における FO 後の撥水性確認。

#### 3.2 試料表面湿潤状態

図 8 に各試料の湿潤状態における電極間距離ごとの FO 電圧を示す。同図より、各電極間距離で汚損なし試料の FO 電圧に対して汚損試料の FO 電圧の低下が見られる。そして、その低下度合いはカーボン汚損試料と、との粉汚損試料で同程度ということが分かった。

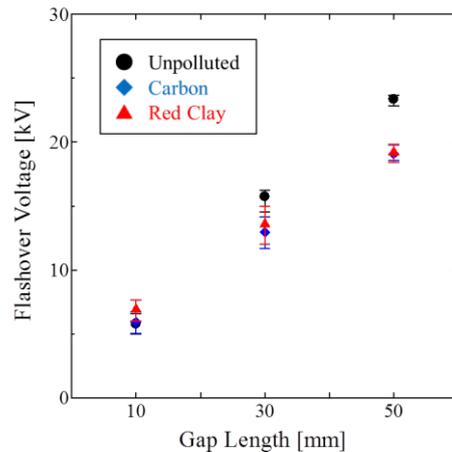


図 8. 乾燥状態における電極間距離ごとの FO 電圧。

図 9 に汚損なし試料が FO に至る過程を示す。ただし、電極間距離による FO に至る過程の違いが見られなかったため、ここでは電極間距離 30mm 試料における FO に至る過程を示している。同図(a)より、電圧印加前は小さな無数の水滴が付着しており、撥水性は STRI 法で HC1 である。そこから昇圧していくと、同図(b)に示すように水滴が大きくなり、また、撥水性が HC2 程度に低下する。これは、交流課電では電圧の極性が常に変化しているため、水滴が振動を行い近傍の水滴と接触し一体化することが原因である。撥水性の低下は、水滴間でコロナ放電が発生することが原因だと考えられる。さらに昇圧を行うと、FO 電圧の 80%程度で、同図(c)に示すように水滴が電極間を橋絡することで水路を形成し、さらにその水路の水分が沸騰し

蒸発する。さらに昇圧すると、同図(d)に示すように FO に至る。FO は同図(c)において撥水性が低下していた経路で発生する。FO 後は放電の経路上の水分は蒸発していた。試験後、霧吹きでイオン交換水を吹きかけ撥水性を調べると、同図(e)に示すように放電の経路となった部分の撥水性が HC6~7 程度まで低下していた。

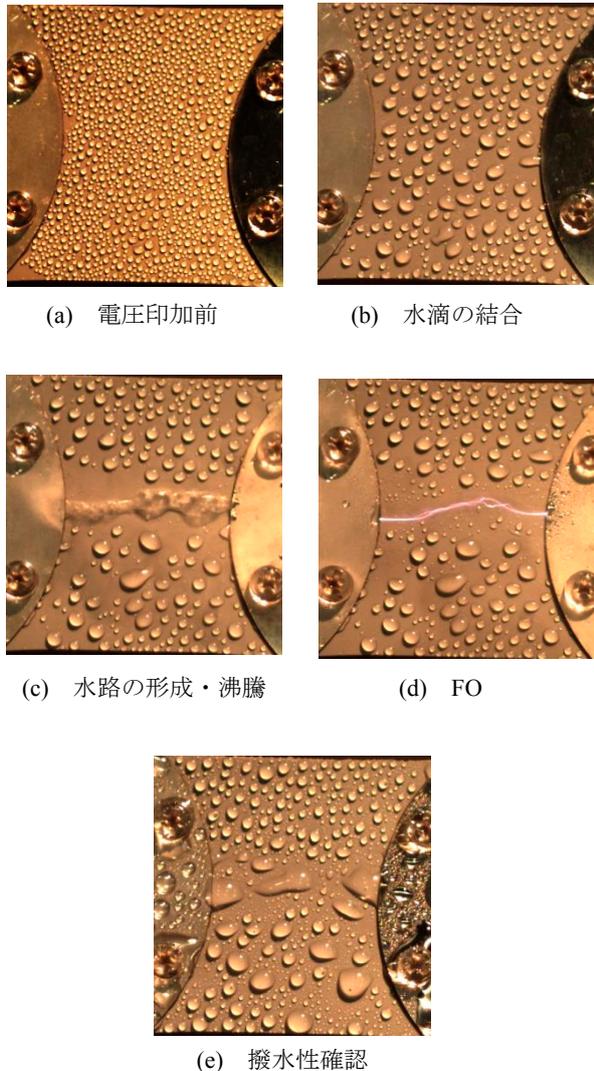


図9. 汚損なし試料が FO に至る過程.

図 10 にカーボン汚損試料が FO に至る過程を示す。ただし、電極間距離による FO に至る過程に違いが見られなかったため、ここでは電極間距離 30mm 試料における FO に至る過程を示している。同図(a)より、電圧印加前はカーボン粉により半球形から崩れた無数の水滴が付着しており、撥水性は STRI 法で HC2 程度である。そこから昇圧していくと、同図(b)に示すように電極と試料の間で部分的な放電が発生し、その箇所が乾燥することでドライバンドが形成される。また、同時に汚損なし試料で見られた電極間の水路の形成・沸騰が見られた。さらに昇圧していくと、同図(c)に示すように、電極間を FO が発生する。FO 後は、

同図(d)に示すように、部分放電が発生した経路の跡が確認できる。試験後、霧吹きで撥水性を調べると、同図(e)に示すように部分放電と水路の形成・沸騰が発生した経路の跡の撥水性が HC7 程度まで低下していた。

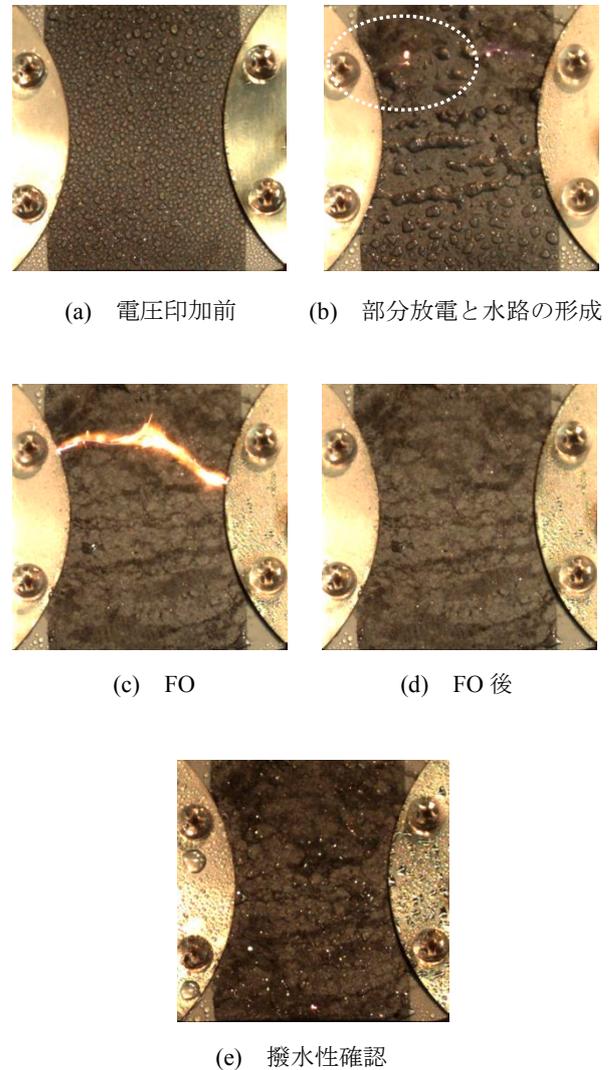
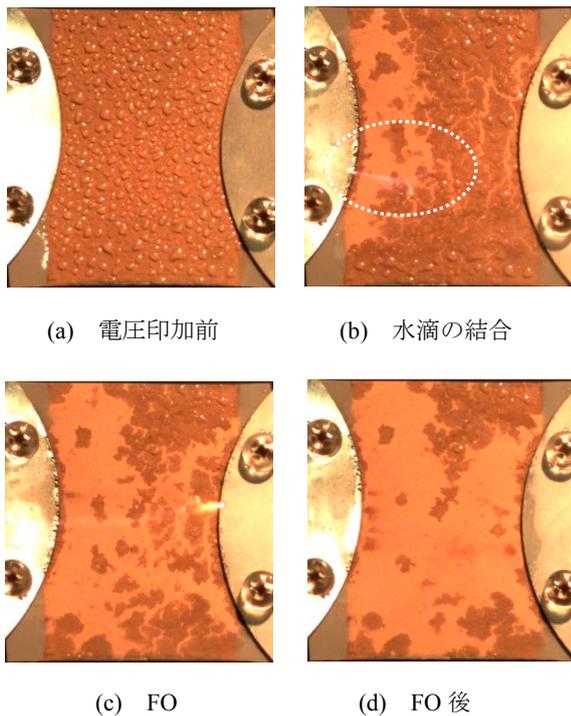


図10. カーボン汚損試料が FO に至る過程.

図 11 にとの粉汚損試料が FO に至る過程を示す。ただし、電極間距離による FO に至る過程に違いが見られなかったため、ここでは電極間距離 30mm 試料における FO に至る過程を説明する。同図(a)より、電圧印加前は、との粉の吸湿性によって水滴ではなく水膜の状態を試料表面に付着しており、撥水性は STRI 法で HC6~7 である。そこから昇圧していくと、同図(b)に示すように電極と試料の間で部分的な放電が発生し、その箇所が乾燥しドライバンドが形成されていく様子が見られた。さらに昇圧すると、同図(c)に示すように電極間を FO が発生する。FO 後は同図(d)であり、FO の発生端や部分放電の箇所でのとの粉が焦げたり、剥がれたりするなどの影響が確認された。



(a) 電圧印加前

(b) 水滴の結合

(c) FO

(d) FO 後

図 11. との粉汚損試料が FO に至る過程.

### 3.3 乾燥状態と湿潤状態の比較

図 5、図 8 より、汚損の有無を問わず試料表面が湿潤することにより FO 電圧が低下することが分かった。これは、試料表面に付着した水分により表面抵抗が低下するためである。また、電極間距離 50mm の各試料の乾燥状態と湿潤状態の FO 電圧は、汚損なし試料で 33.7 kV と 23.4 kV、カーボン汚損試料で 30.0kV と 19.1 kV、との粉汚損試料は 33.8 kV と 19.2kV であり、FO 電圧の低下度合いは、との粉汚損試料が最大であることが分かった。これは、との粉の吸水性によるものだと考えられる。

FO に至る過程は、乾燥状態では表面の状態に関わらず昇圧していくと突発的に FO が発生したが、湿潤状態においては、汚損なし試料では水滴が交流課電の影響を受け、FO 以前に FO が発生する経路で電極間を橋絡して沸騰する過程が見られた。汚損試料では、昇圧中に電極と試料間で部分放電が発生しドライバンドを形成する過程が見られた。

## 4. まとめ

人工的に汚損させた SiR 試料を用いて交流課電 FO 試験を行い、汚損物質が SiR の耐電圧特性に与える影響を評価し、FO に至るまでの過程を比較・検討した。その結果、汚損状態や表面の湿潤が FO 電圧や FO に至る過程に与える影響が明らかになった。汚損を施していない状態では、表面の水滴が課電による影響を強く受け、水滴間のコロナ放電による撥水性の低下や、水路の橋絡からトラッキング

の形成などの過程を経て FO に至ることが分かった。汚損状態では、昇圧中に電極と汚損物間で放電が発生し、ドライバンドの形成を経て FO に至ることが分かった。また、カーボンやとの粉の性質の違いが、乾燥状態と湿潤状態において FO 電圧や FO に至る過程に与える影響が異なることが明らかになった。

## 参考文献

- 1) R. Hackman: "Outdoor HV Composite Polymeric Insulators", IEEE Trans. DEI, Vol.6, No.5, pp. 557 – 585 (1999)
- 2) Takuma Miyake, Yuya Seo, Tatsuya Sakoda, Masahisa Otsubo: "Assessing Long-term Reliability of Polymeric Housing Materials", Institute of Electrical Engineers of Japan Transactions on Power and Energy, Vol. 131, No. 6, pp. 530-531 (2011)
- 3) STRI Guide 9211, "Hydrophobicity Classification Guide." 1992